

반응표면법을 이용한 WPM의 exciter pole 설계 및 해석

육경진, 박관태, 이규종, 김병택
군산대

Exciter Pole Design and Analysis of WPM using Response Surface Method

Kyeong-Jin Yuk, Gwan-Tae Park, Gyu-Jong Lee, Byung-Taek Kim
Kunsan National University

Abstract - 본 논문에서는 WPM의 기동시 감자된 영구자석을 착자시키는 exciter pole의 최적설계에 대해 다룬다. 영구자석형 동기전동기의 성능을 결정짓는 자석의 잔류자속밀도를 최대 만들기 위하여 반응표면법을 이용하여 exciter를 설계하였다. 목적함수는 영구자석 중심에서의 자계의 세기이며 정밀도를 위하여 유한요소법을 통해 결과를 확인하였다.

1. 서 론

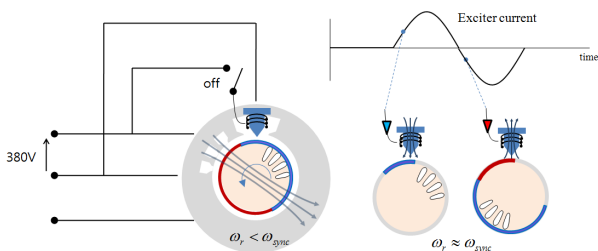
3상 written-pole motor(WPM)은 직입극동형 영구자석 동기전동기의 일종이지만 기동시에는 회전자 표면의 영구자석은 고정자측의 기자력에 의하여 감자가 되어 농형 유도전동기로 동작을 한다 [1][2]. 이 감자된 자석을 착자시키는 목적으로 고정자에 exciter pole이 위치하며 exciter의 동작 후 동기전동기로 운전을 한다. 영구자석 유도전동기와 비교할 때 기동운전구간에서 유도동기전동기는 자석에 의한 제동토크의 영향으로 기동성능이 크게 약화되는 반면 WPM은 자석이 감자되므로 제동토크 문제가 없다.

운전시마다 자석을 착자시켜야 하는 WPM의 경우 영구자석의 착자량에 따라 전동기의 성능이 결정된다. exciter pole의 동작에 의해서 자석의 착자량을 최대 만들기 위한 최적화 설계를 진행한다 [3]. 설계에는 반응표면법을 사용한다. 반응표면법은 특성과 설계변수들과 함수관계를 말하며, 반응표면에 대한 통계적 모형을 가정하고, 여러 조건에서 실험을 수행한다 [4]. 최소의 실험회수로부터 의미있는 데이터를 취득하며 주로 실험계획법이 적용된다. 실험계획법에 의거하여 데이터 취득 후 회귀분석을 통하여 반응표면식을 추정한다. 추정된 반응표면식의 유효성을 검증하고 이 식으로부터 최적의 설계변수의 조합을 찾아낸다.

2. exciter pole의 동작과 설계

2.1 exciter pole의 동작

고정자에 위치한 exciter pole의 전원은 주전원과 병렬로 연결되며 exciter 동작시 흐르는 전류의 주파수는 주전원과 동일하다. Exciter는 WPM의 기동 후 동기속도 부근에서 동작하며 교번기자력이 발생되어 영구자석을 고정자의 극수만큼 착자시킨다.

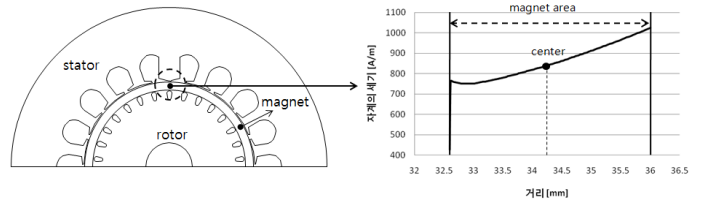


〈그림 1〉 WPM의 exciter 동작

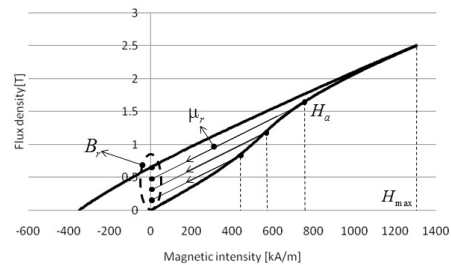
2.2 exciter pole의 착자성 판정

exciter pole의 스위치가 on하여 기자력은 영구자석을 착자시키고 영구자석은 잔류자속밀도를 갖는다. 잔류자속밀도는 영구자석의 재질정보로부터 알 수 있다. 그림2와 같이 자석의 중심에서 자계의 세기를 측정한다. 측정값이 H_a 일 경우 recoil line을 적용하여 잔류자속밀도를 예측한다.

$$B_r = B_a - (\mu_0 \mu_r H_a) \quad (1)$$



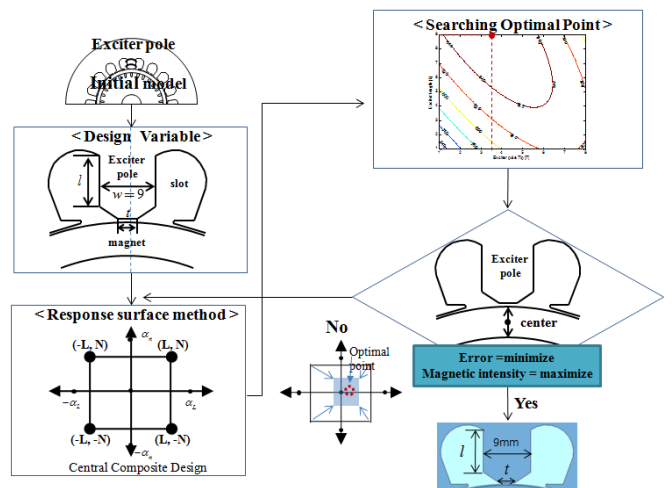
〈그림 2〉 영구자석의 자계의 세기 측정



〈그림 3〉 영구자석의 잔류자속밀도 예측

2.3 반응표면법을 이용한 exciter pole의 설계

본 연구에서는 영구자석의 착자량을 최대 만들기 위하여 반응표면법을 이용한 exciter pole의 설계를 진행한다. exciter pole 설계순서는 다음과 같다.



〈그림 4〉 반응표면법의 순서도

먼저 WPM의 초기모델로부터 변수를 선정한다. exciter의 pole의 높이 l 에 따라 권선의 형태가 변화하고 이에 따라 자석부의 기자력에 영향을 받는다. 또한 pole이 공극면과 접하는 부분의 폭 t 는 자석의 집중도에 영향을 주므로 변수로 지정하였다. exciter pole의 기자력을 집중시키는 데 영향을 미치는 l 과 t 를 변수로 선정한다. 변수의 수준은 초기형태를 기준으로 $l=1\sim 9\text{mm}$, $t=1\sim 8\text{mm}$ 로 선정한다. exciter가 운전될 때 pole이 심하게 포화되고, 이는 기자력 감소를 의미하므로 자석을 착자하는데 불리하다. 따라서 pole의 폭 w 는 넓을수록 유리하므로 고정자의 주변형상을 고려하여 최대한 넓게 9mm로 고정시켰다.

실험계획으로부터 얻은 데이터를 이용하여 변수범위 내의 다른 값을 예측할 때의 정확성을 높이기 위해서 중심합성계획을 이용하였다. 실험점은 총 9개이며 데이터 취득 후 회귀분석을 통하여 반응표면식을 추정한다. 추정된 반응표면식의 유효성을 검증하고 이 식으로부터 최적의 설계변수의 조합을 찾는다. 특성치는 영구자석의 중심에서 자계의 세기의 세기이며 유한요소해석을 통해 표시한다. 유한요소해석시 exciter 권선에는 10000[A/m]로 동일하게 인가하였다. 중심합성계획을 사용하여 9개의 설계변수 조합을 표1에 나타내었으며, 2차 반응표면식을 추정하기 위한 회귀방정식을 제시한다.

<표 1> 1차 실험점에 대한 특성 해석치

실험번호	exciter 길이(l)	exciter tip 폭(t)	자계세기(kA/m)
1	2.17	2.02	775.7
2	7.83	2.02	851.4
3	2.17	6.98	823.7
4	7.83	6.98	833.5
5	1	4.5	814.1
6	9	4.5	841.1
7	5	1	792.8
8	5	8	820.1
9	5	4.5	843.8

9개의 실험점으로부터 2차 반응표면식을 추정하기 위한 회귀방정식을 식(2)에 나타내었다.

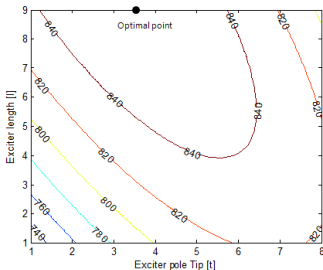
$$\hat{y}_i = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \beta_3 x_2 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + \beta_6 x_1 x_2 + \epsilon \quad (2)$$

회귀방정식의 계수는 다음과 같다.

<표 2> 회귀방정식 계수

계수	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
\hat{y}_1 [kA/m]	667.95	24.859	41.005	-0.882	-2.866	-2.348

회귀 방정식으로부터 설계변수의 변화에 대한 자계의 세기 분포도를 나타내었다.



<그림 5> 중심합성설계를 통한 자계의 세기 분포도

분포도로부터 자석의 중심에서 자계의 세기가 최대인 점은 $t=3.49\text{mm}$, $l=9\text{mm}$ 이며, 이 결과에 대해 유한요소해석을 실행하여 반응표면법과 비교를 하였다.

<표 3> 반응표면법과 유한요소해석의 비교

	반응표면법	유한요소해석	Error
\hat{y}_1 [kA/m]	854.6	844.1	10.5

해석 결과로부터 반응표면법과 유한요소해석의 오차가 크게 발생하여 이를 줄이고자 변수의 수준을 감소시켜 2차 실험점을 선정한다. 설계의 수준은 1차 실험의 최적점을 기준으로 설계수준을 $t=2\sim 4\text{mm}$, $l=7.5\sim 9.5\text{mm}$ 로 축소하여 순차적 실험을 수행하였으며 실험점을 나타내었으며, 특성치는 생략하였다.

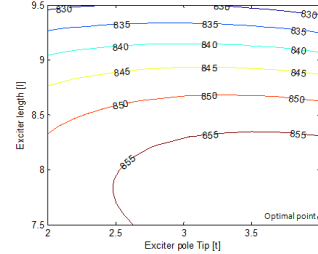
<표 4> 2차 실험점

	$-\alpha$	-1	0	1	α
$x_1(l)$	7.5	7.79	8.5	9.2	9.5
$x_2(t)$	2	2.29	3	3.7	4

<표 4>로부터 얻은 2차 회귀방정식의 계수와 자계의 세기 분포도를 나타내었다.

<표 5> 회귀방정식의 계수

계수	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
\hat{y}_1 [kA/m]	221.46	147.48	39.136	-8.972	-2.233	-2.808



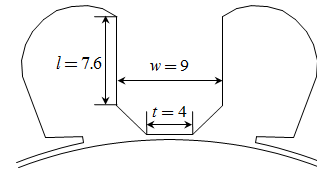
<그림 6> 순차적 실험에 따른 자계의 세기 분포도

exciter pole의 변수에 따른 자계의 세기 분포도로부터 최적점 $t=4\text{mm}$, $l=7.6\text{mm}$ 를 얻었으며 유한요소해석과 비교하였다.

<표 6> 반응표면법과 유한요소해석의 비교

	반응표면법	유한요소해석	Error
\hat{y}_1 [kA/m]	859.58	860.55	0.97

1차 중심합성계획을 실시하였을 때보다 반응표면법과 유한요소 해석의 오차는 감소하였으며 영구자석 중심에서 더 높은 자계의 세기가 나타났다. 결정된 exciter pole의 형태는 다음과 같다.



<그림 7> 반응표면법을 통한 exciter pole의 최적설계결과

3. 결 론

본 논문에서는 WPM의 성능을 결정짓는 영구자석의 착자량을 최대 로 만들기 위하여 반응표면법을 이용한 exciter pole 설계를 시행하였다. 그 결과 자석 중심에서의 자계의 세기는 증가된 값을 얻었으며 유효함을 증명하기 위하여 유한요소해석의 값과 비교하였으며 오차가 감소하였다. 향후 exciter의 기자력을 최대화하기 위한 권선 설계를 진행한다.

[참 고 문 헌]

[1] T.J.E. Miller, "Synchronization of line-start permanent-magnet AC motor." IEEE transaction on power apparatus and system, vol. PAS-103, no. 7, July 1984
 [2] H. Zabet Khosousi and M. Mirsalim, "Dynamic modeling of a 20-Horsepower single-phase written pole motor." IEEE transaction on magnetics, vol 40, no.4, pp1901-1904, July 2004
 [3] Byung-Taek Kim, "Exciter design and characteristic analysis of a written pole motor", IEEE transaction on magnetics, vol.45, no.3, pp1768-1771, March 2009
 [4] 박성철, 신덕식, 조주희, 김대경, 김병택, "Written Pole Motor(WPM)의 회전자 슬롯 형상에 따른 착자 특성", 대한전기학회, 2010 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, pp113~115, 2010